雪粒子飛び出し風速と雪粒子結晶形

北見工業大学　佐藤研吾　高橋修平

1　はじめに

地吹雪の発生条件を調べるために、ミニ風洞を用いて自然雪面の雪粒子飛び出し風速 V_T を測定した。平行して雪粒子終端落下速度w、粒径、安息角、結晶形、気温測定を行い、その関連を調べた。飛び出し風速は新雪時 3～5m/s であったが、1～3 日間で約 10m/s となった。雪粒子の安息角測定による摩擦係数および飛び出し風速、終端落下速度から雪面と雪粒子間の結合力比を見積もり、結晶形別に分類した。

2　雪粒子飛び出し風速･終端落下速度

平らな積雪表面の雪粒子の釣合い(図 1)において、風によって抗力を受けて飛び出そうとする時に、雪粒子が受ける空気抗力 Fv は

$$F_V = C\rho_0 S V_0^2 \qquad (1)$$

(C：抵抗係数　S：断面積)

雪粒子が雪面から受ける力 F_f は

$$F_f = \mu mg + Fb \qquad (2)$$

(μ:摩擦係数　Fb:粒子間結合力)

雪粒子が飛び出す瞬間はこれらの力が釣合い、$F_V = F_f$

$$C\rho_0 S V_0^2 = \mu mg + Fb \qquad (3)$$

が成り立つ。

静止空気中での雪粒子の運動について考えると

$$C\rho_0 S w^2 = mg \qquad (4)$$

(w:終端落下速度)

雪粒子が雪面から飛び出す時の風速を V_T とすると、$C\rho_0 S$ を消去することができ、

$$V_T = K\sqrt{\mu + \frac{F_b}{mg}}w \qquad (5)$$

(K:粒子高さの補正係数)

以上のように理論上では、飛び出し風速 V_T と静止空気中における終端落下速度wは比例関係となる。

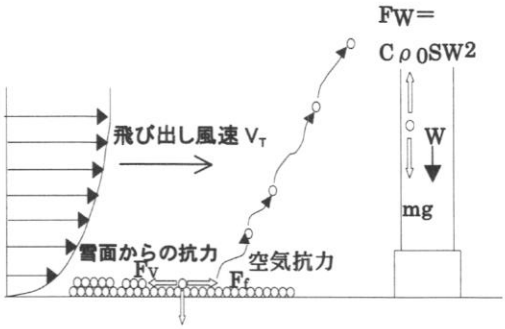


図 1　雪粒子にかかる力の概念図

3　観測方法

吹雪発生を想定し、ミニ風洞の中で雪粒子を飛ばす実験を行った。北見工業大学構内グラウンドにおいて、2003 年 1 月 1 日～2 月 28 日、毎朝 7～9 時に観測を行った。積雪表面を乱さない状態で表面積雪サンプルを採取して、ミニ風洞下部(図 2)に設置し、風洞内の風下から吸引し、風速を徐々に上げていき雪粒子が飛び出した時の風速 V_T を得た。同時に終端落下速度wの測定を行った。終端落下速度測定装置(図 3)は、自然積雪表面より雪粒子を採取し高さ約 180cm、直径 8cm の筒の中を落下させ、間隔 20mm の 2 つの赤外センサーを通過させる。センサーを通過する時間から速度を求め、信号強度により粒径を求める。雪粒子 50～100 個の値の平均を測定結果とした。

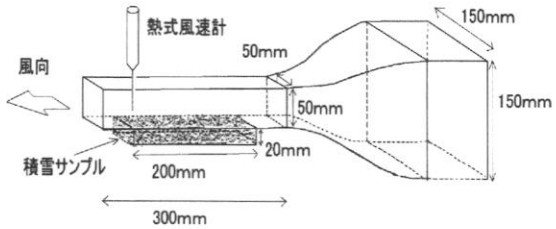


図 2　ミニ風洞

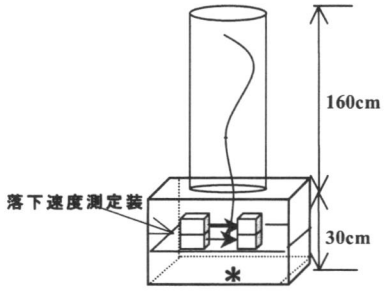


図3　終端落下速度測定装置

4 雪粒子飛び出し風速

図4に雪粒子飛び出し風速V_T、実験時気温、日降雪深、毎時間気温を表す。V_Tの＊印は表面積雪が乾いた新雪であることを示し、○印はその他の雪粒子形状を示す。2001年1月19、27、30日は1cm以上の降雪があり、V_Tは5m/s前後と小さい値を示したが、それぞれ降雪から1～2日経過すると約10m/sと大きな値となった。降雪後の最高気温はほとんど-5℃以上であり、急にV_Tが大きくなったと考えられる。

V_Tの増大する原因としては、昇華や表面融解により表面が滑らかな形状に変化して、空気抵抗が小さくなることや、雪面と雪粒子間の結合力が増加することが考えられる。

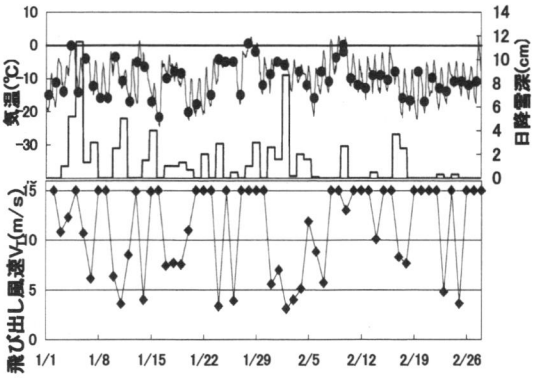


図4　飛び出し風速 V_T と気象条件

5　雪粒子終端落下速度

図5に2001年1月1日～2月28日の終端落下速度と粒径の観測結果を示す。また図6に粒径と終端落下速度の関係を示す。新雪の場合(＊印)の終端落下速度は、粒径によらず0。5～1。2m/sの小さい値を示したのに対し、新雪ではない雪の場合、終端落下速度は1。2m/s以上の値を示し、粒径が大きいほど終端落下速度は大きくなる傾向を示した。これは降雪後時間を経ると、粒子が丸みを帯びて球の場合の関係式に近づくと説明される。

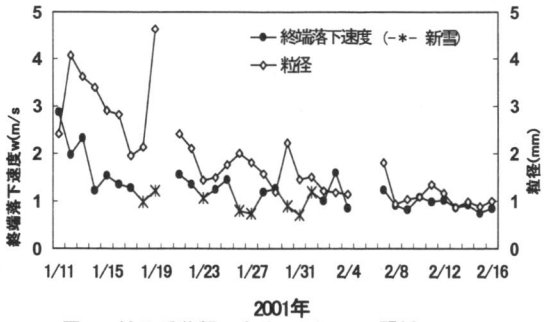


図5　結晶系分類による V_T と W の関係

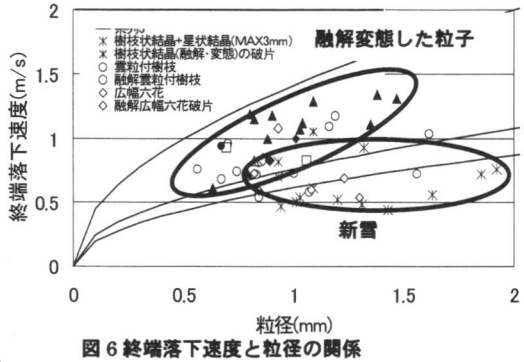


図6 終端落下速度と粒径の関係

6　結晶形による違い

2003年1月1日～2月28日における飛び出し風速V_Tと顕微鏡写真から判断した雪結晶形を示す。ザラメ雪(融解･再凍結の結果，大きい粒径となった雪粒子)はV_Tの測定限界である15m/s以上である。

雪粒子結晶形等による違いをさらに明らかにするため、図6に飛び出し風速V_Tと終端落下速度wの関係を結晶形別に表す。樹枝状結晶の場合は，V_T＝4～6m/s，w＝0。6～1。0m/sであり，広幅六花や雲粒付樹枝は、V_T＝5～10m/s，w＝1。0～1。5 m/sの範囲にあった。融解変態粒子の場合、雪粒子結合力Fbが大きくなったためV_Tも大きくなったと考えられる。

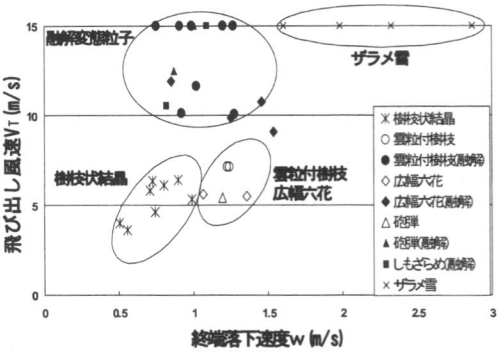


図 6　結晶系分類による V_T と W の関係

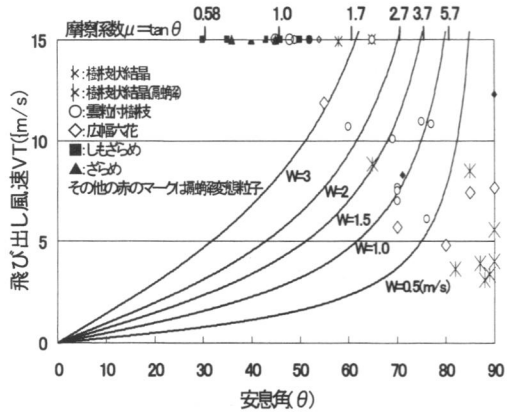
7　安息角による摩擦係数観測

雪粒子間の摩擦力を調べるために安息角の観測を行った。安息角を θ とする時、雪粒子の摩擦係数 μ は

$$\mu = \tan\theta \qquad (6)$$

と表される。

安息角の測定は積雪表面の雪粒子を採取し、人工的に雪粒子を落下させて直径 6cm の円板に雪を積もらせ、円錐形の斜面の角度を測定した。図 7 に安息角実験による摩擦係数 μ と V_T の関係を示す。データ(＊印)は w＝0。5m/s 前後の値に相当するが、旧雪はこの関係式から大きくはずれ、大きな V_T を示す。これは融解･再凍結のために、雪粒子結合力 Fb が大きくなり、式（5）において Fb が無視できなくなったためと考えられる。



6　粒子と雪面間の結合力の考察

前述した雪粒子結合力 Fb について考察すると、(5)式より Fb/mg は、

$$\frac{F_b}{mg} = \frac{V_T^2}{K^2 W^2} - \mu \qquad (7)$$

と表される。Fb/mg は積雪表面粒子が雪面に対し、どのくらいの強度で付着しているかの指標となる(以後、「結合力比」とする)。安息角 θ から求めた摩擦係数 μ (＝tan θ)と、V_T、w の測定値より式(6)を用いて求めた結合力比 Fb/mg を図 8 に示す。新雪である広幅六花や樹枝状結晶のとき、1～3 と結合力比が小さいのに対し、1 月 28 日以降は融解再凍結を繰り返したため、雪粒子結合力が発生し、結合力比 Fb/mg は 5～10 という大きな値を示したと考えられる(図 9)。

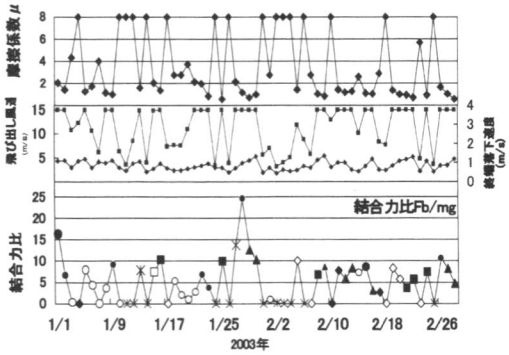


図 8 結合力比の時系列

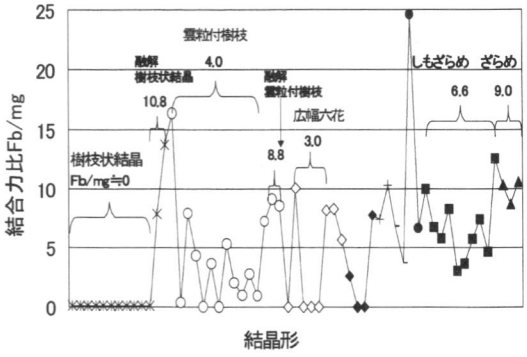


図 9　結合力比の結晶形別

7 まとめ

1)　自然雪面の雪粒子飛び出し風速 V_T は降雪後、日数を経るに従い大きくなった。樹枝状結晶の場合 5m/s 前後だったが、雪粒子の変態に伴い 1～3 日間で 10m/s 以上に大きくなった。

2)　枝状結晶の場合、雪粒子飛び出し風速 V_T は 5m/s 前後と小さく、広幅六花や雲粒付樹枝は 5～10m/s の値を示した。融解変態雪粒子は 10m/s の大きい値を示した。

3)　安息角は新雪時で 50° 以上、雲付結晶や旧雪では 50° 以下となった。

4)　安息角による摩擦係数 μ と飛び出し風速 V_T 及び終端落下速度 w から、粒子結合力 Fb を自重で割った結合力比 Fb/mg が見積もられ、樹枝状結晶ではほぼ 0 と小さく、融解変態粒子については 5～25 の大きい値を示した。